大型海藻规模栽培是增加海洋碳汇和解决近海环境问题的有效途径

杨宇峰[1,2*]　罗洪添[1,2]　王 庆[1,2]　贺志理[2,3]　龙爱民[4]

1 暨南大学 生命科学技术学院/广州区域低碳经济重点研究基地 广州 510632
2 南方海洋科学与工程广东省实验室（珠海） 珠海 519000
3 中山大学 环境科学与工程学院 广州 510006
4 中国科学院南海海洋研究所 广州 510301

摘要　当前，世界各国均关注于减缓气候变暖、降低大气二氧化碳（CO_2）排放为核心目标的低碳和碳中和理念。海洋是地球最大的碳库，在降低大气CO_2浓度方面具有重要作用。地球上超过一半的生物碳由海洋生物完成。大型海藻栽培具有成本低、产量高、碳汇可计量、栽培可控性强等优势；在近海可形成产业化的蓝碳，是海洋碳汇值得推崇的可持续发展模式。此外，规模栽培大型海藻可解决栽培海区海洋酸化、低氧、富营养化、有害藻华等海洋环境问题。文章从大型海藻栽培、环境修复作用及综合效益评估等方面综述了大型海藻碳汇功能及其解决近海环境问题的潜力。大型海藻规模栽培是发展低碳经济、增加海洋碳汇、实现碳中和，以及解决近海环境问题的有效途径。

关键词　大型海藻，碳汇，低碳经济，可持续发展，环境修复

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.20210217103

应对气候变化是国际共识，是我国践行“人类命运共同体”理念、积极参与全球治理的历史性机遇。当前，减缓气候变暖、降低大气二氧化碳（CO_2）排放为核心目标的低碳经济和碳中和理念已成为我国应对气候变化、保障经济社会可持续发展的“动员令”和“集结号”。截至2020年10月，全世界已有 85个国家提出了碳中和目标，其中29个国家明确了2030—2060年碳中和时间表。2020年9月22日，国家主席习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话，重申中国“二氧化碳排放力争于2030年前达到

*通信作者

资助项目：国家重点研发计划（2020YFD0901101），国家自然科学基金项目（41977268），南方海洋科学与工程广东省实验室（珠海）创新团队建设项目（311020005）

修改稿收到日期：2021年2月28日；预出版日期：2021年3月7日

峰值，努力争取2060年前实现碳中和”的宏伟目标。中国政府于2021年2月1日开始施行《碳排放权交易管理办法（试行）》，启动了碳排放权交易项目，初期将有2 225家企业划定排放配额。要实现2060年前中国碳中和这一宏伟目标，部分产业必须先期达到碳中和。然而，不同行业实现碳中和的产业目标和技术措施不尽相同。大型海藻具有成本低、产量高、碳汇可计量、栽培可控性强等优势，在近海可形成产业化的蓝碳，是海洋碳汇值得推崇的可持续发展模式。大型海藻规模栽培是发展低碳经济、海洋碳汇渔业、实现碳中和及解决区域海洋环境问题的有效途径，有望在海洋产业碳中和中起到“排头兵”和“领头羊”的作用。

1 大型海藻资源

大型海藻资源包括天然海藻和人工栽培大型海藻。全球主要栽培大型海藻约有100种，其中海带、江蓠、裙带菜、紫菜、麒麟菜的产量约占大型海藻栽培总产量的98%。中国、印度尼西亚和菲律宾三国产量超过了世界大型海藻产量的90%[1]。我国大型海藻栽培产量和面积一直稳居世界首位，产量达到$1.7×10^7$ t（鲜重）[1]，已记录的大型海藻种类超过1 200种[2]。2017年，全球大型海藻年产量（鲜重）为$3.181×10^7$ t，但与陆地植物$16×10^{11}$ t的生物量比较，大型海藻产量还有广阔的提升空间[3]。研究表明，包括大型海藻在内的“蓝碳”植物，其碳封存量是陆地植物的10倍[4]。大型海藻栽培提高了初级生产力，有助于全球碳、氧和养分循环[5]，进而防治富营养化和减少温室气体[6]。海洋初级生产者对全球碳的固定作用占50%以上，碳储存高达71%[5]；大型海藻是海洋初级生产者的重要组成部分，占全球生物碳储存的很大比重，从而成为减少温室气体排放的一种有效手段。规模栽培大型海藻在减缓全球升温和降低大气CO_2方面具有巨大潜力。

2 大型海藻碳汇功能

CO_2是全球气温升高主要贡献者。据统计，全球CO_2排放量大约每年30 Gt，且每年上升$6×10^4$ t，这导致全球碳循环不平衡及CO_2在大气中累积[7]。预计2100年大气CO_2浓度数值是目前大气CO_2浓度的2.5倍。伴随着大气CO_2浓度持续升高，全球变暖速度也将进一步加剧。因此，如何减缓全球变暖速度，以及降低大气CO_2浓度，已成为全球关注的热点[4]。

2.1 大型海藻碳汇作用及蓝碳战略

海洋在减缓全球升温和降低大气CO_2方面具有重要作用[4,8]。根据联合国《蓝碳：健康海洋对碳的固定作用——快速反应评估报告》，海洋碳储量约为$3.8×10^{13}$ t，比大气多50倍，地球上超过一半（55%）生物碳或绿色碳捕获由海洋生物完成，这些海洋生物包括大型海藻、红树林、盐沼植物、细菌和浮游植物[4,9,10]。大型海藻资源丰富，规模栽培大型海藻具有成本低、产量高、碳汇可计量、栽培可控性强等优势，在近海可形成产业化的蓝碳，是海洋碳汇值得推崇的可持续发展模式[4]。

碳中和指人类经济社会活动所必需的碳排放，通过植树造林、研发可再生能源、增加温室气体吸收、节能减排等“负排放技术”加以捕集、利用或封存形式，以抵消自身产生的CO_2排放量，实现CO_2“零排放”。中国是发展中大国，要实现碳中和目标，必须大力减少CO_2排放并增加CO_2吸收[11]。2010年，海洋微型生物碳泵（MCP）储碳机制理论[12]引领了碳中和与负排放领域研究。近10年来，“中国蓝碳计划”得到大力推进[13-15]。该计划中大型海藻处于非常重要的战略地位：① 可有效增加海洋固碳能力，增加海洋负排放，减缓全球变暖；② 可防治近海富营养化、海洋酸化、有害藻华等环境问题[16,17]。大型海藻为大气CO_2主要捕获载体，规模栽培的大型海藻在生长过

程中能高效进行光合作用，增加海洋碳汇。收获的大型海藻还可生产琼胶和作为鱼、鲍等经济动物饵料。部分大型海藻凋落物形成碎屑或被微型生物分解后形成溶解有机碳（DOC）输出至附近海域，起到积极的碳汇作用。在大型海藻碳汇过程中，生物泵（BP）和微型生物碳泵均发挥了重要功能[12,13]。目前，我国大型海藻栽培海域面积仅占我国近海海域面积的0.3%，大型海藻栽培规模还有巨大潜力和发展空间[11]。大型海藻栽培还可通过发展贝藻、鲍藻、鱼藻复合养殖提高经济动物养殖海域的固碳增汇能力。大型海藻规模栽培不仅能直接驱动养殖海域生物地球化学循环，还具有重要的碳中和与负排放作用[18-20]。

大型海藻碳汇过程和生态修复机理主要包括：① 通过光合作用，吸收碳（C）、氮（N）、磷（P），降低海水N、P和大气 CO_2 浓度，增加海洋碳汇和水体溶氧；提高pH值，防治海洋酸化；高效吸收N、P，防治海域富营养化。因此，大型海藻规模栽培能有效改善水质和沉积环境，具有良好的生境修复效应。② 通过改善水体和沉积环境，提高浮游动物休眠卵的孵化率[21]；部分微生物和浮游生物附着在大型海藻体表，互利共生；微生物参与大型海藻生态过程多个环节[22,23]，是栽培区大型海藻碳汇和N、P生物地球化学过程主要“协助者”。③ 大型海藻规模栽培对浮游生物群落结构稳定具有重要作用；在抑制有害藻华的同时，提高浮游植物多样性（图1）。

2.2 大型海藻固碳能力及效益

大型海藻固碳潜力预测显示，全球陆架区大型海藻固碳潜力每年可达0.7 Gt，约占全球海洋年均净固碳总量的35%[24]。权伟等[25]对我国海藻碳汇研究表明，1999—2012年我国近海大规模栽培的大型海藻年均固碳量分别为：海带 26.45×10^4 t、裙带菜 3.23×10^4 t、紫菜 2.24×10^4 t、江蓠 2.01×10^4 t、其他 7.93×10^4 t，合计 41.85×10^4 t。上述时段内，大型海藻栽培年均产生生态价值609亿元；其中，固定 CO_2 生态价值年均为4.29亿元，释放氧气（O_2）生态价值年均为6.34亿元，吸收N、P元素生态价值年均为598亿元，占总价值比例超过98%[26]。2014年，中国、韩国、日本、印度尼西亚、印度、马来西亚、菲律宾、越南等亚太地区栽培大型海藻的国家减排 2.87×10^6 t CO_2，碳市场价值2 880万美元[27]。

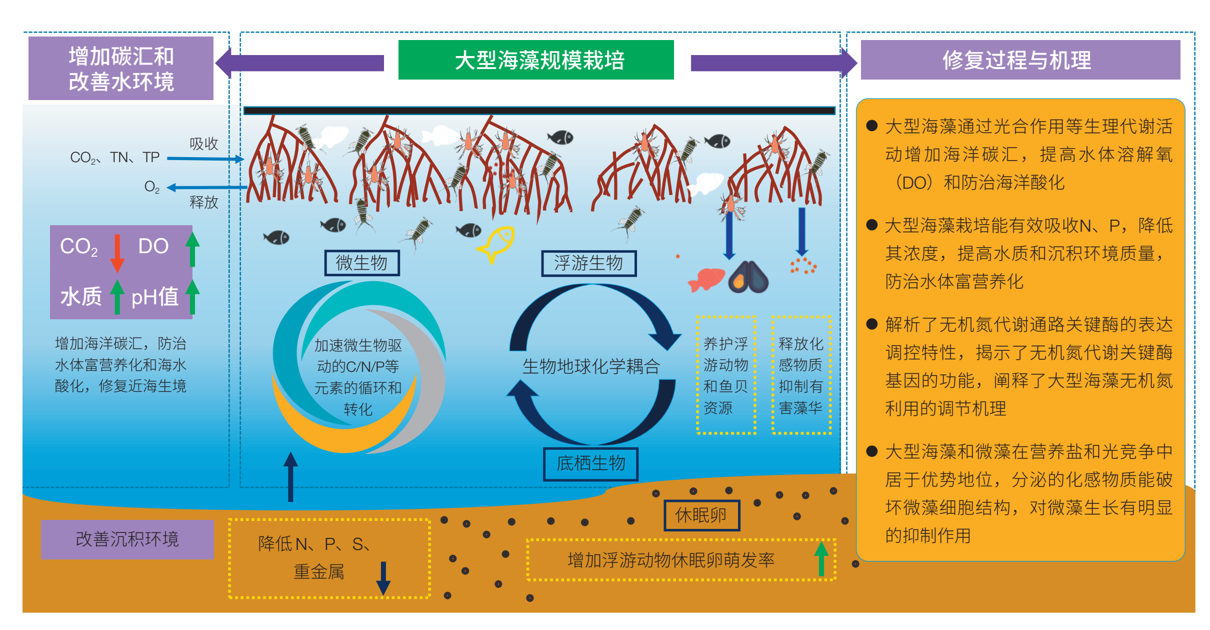


图1　栽培区大型海藻碳汇过程和生态修复机理

Figure 1　Carbon sequestration processes and bioremediation mechanism of seaweeds in cultivation area

3 解决近海海洋环境问题的潜力

大型海藻通过光合作用吸收海水 CO_2，增加海洋碳汇，促进并加速大气 CO_2 向海水扩散，在增加海洋碳汇方面具有重要的生态环境作用。收获的大型海藻用作医药、化工、食品及动物饲料、农业肥料等原料[6,15]。此外，大型海藻在解决海洋酸化、低氧、富营养化、有害藻华等一系列生态环境问题方面具有重要的作用[28]。

3.1 海洋酸化和低氧

进入到大气中的 CO_2 经过漫长的时期最终会与海洋达到平衡。模拟研究发现，若将 1 095 mol 的 CO_2 加到大气中，1 000 年后大气 CO_2 将会降低至 15 mol，海洋中增加的无机碳（985 mol）大部分以碳酸盐或碳酸氢盐等无机碳形态存在[29]。自工业革命以来，人为排放成了大气 CO_2 的主要来源，大气 CO_2 浓度一直稳步上升，近几十年已达到 0.04%[30]。200 多年间，人类生产活动排放的 CO_2 中大约 1/3 被海洋吸收，从而导致海洋环境产生巨大变化[31]。

到 21 世纪末，CO_2 排放将使海洋表层平均 pH 值从 8.2 降低到 7.8[32]。日益严重的海洋酸化现象正成为严峻的全球生态环境问题。据预测，海洋对 CO_2 持续吸收将导致未来几个世纪海洋的 pH 值下降幅度超过过去 3 亿年，将对海洋生物产生重大影响[30]。海洋溶解氧（DO）含量将在 100 年内下降 1%—7%，并将在 1 000 年甚至更长时间内进一步下降[33]。低氧区 CO_2 更易被海水吸收，这无疑将加剧海洋酸化[34]。增加海区大型海藻栽培面积和产量能提高海水 pH 值和 DO，有效防止海洋酸化，遏制近海低氧。据估算，2015 年全球大型海藻栽培至少向海水中净释放了 2.42×10^6 t O_2，提高了栽培海域及其邻近区域 DO，减轻低氧区不利影响，在相当程度上能遏制低氧区扩大[35]。

3.2 海水富营养化和有害藻华

人类生产活动加剧所产生的大量 N、P 被输送到海洋；N、P 等营养盐在海水中的过度增加，不仅是营养盐绝对数量上的升高，而且也导致其结构和比例变化，并引发海洋生态系统中有机质增多、低氧区形成、藻华爆发等过程[36]。大型海藻具有良好的营养盐吸收能力，其规模栽培能缓解近海富营养化[37]。据估算，2015 年中国栽培的大型海藻去除海域中 7.56×10^4 t N 和 0.96×10^4 t P，封存 5.40×10^5 t C，吸收 1.98×10^6 t CO_2，释放 1.44×10^6 t O_2[38]。1 hm^2 大型海藻栽培可去除 17.8 hm^2 海域的 N 和 126.7 hm^2 海域的 P，以此推断，增加 17 倍或 1.5 倍大型海藻栽培面积就可 100% 去除中国沿海输入的 N 或 P[35,36]，能有效解决近海富营养化问题。

有害藻华频发在全球灾害性的影响急剧扩展，其频繁发生是海洋生态系统受损与退化的警示，且局部海域富营养化问题日益突出。研究发现大型海藻龙须菜和浮游植物间存在竞争关系，可通过 N、P 营养竞争和他感作用抑制浮游植物生长[15,39]。大型海藻栽培能抑制浮游植物生长，不仅因为大型海藻在与浮游植物营养竞争中的优势[39]，还因其对浮游植物具有较强的化感作用[37]。研究表明龙须菜对锥状斯氏藻、海洋原甲藻、杜氏盐藻具有很强的抑制作用[37]。大型海藻规模栽培是防治有害藻华发生的生态环保模式。

中国海水养殖产量多年位居世界第一，经济鱼、贝的比例多年占 90% 左右。以经济鱼、贝类养殖为主的海水养殖模式在迅猛发展的同时带来了诸如养殖水域生境退化、富营养化严重、有害藻华频发等一系列环境问题[40]。研究表明以龙须菜为代表的大型海藻通过规模栽培及与鱼、贝复合养殖，可有效修复养殖环境、优化养殖生态系统结构功能，养护经济动物等渔业资源，可实现海水养殖的绿色生产[41-43]（图 2）。

4 龙须菜产业链的跨越式发展为大型海藻规模栽培提供了成功范例

2000 年以前，我国近海尚未开展大型海藻龙须菜人工栽培。龙须菜规模栽培始于汕头南澳。南澳龙须

菜栽培面积从2000年的1亩发展到现在的2万多亩，产量从2000年0.3 t增长到2018年46 700 t（干重）。到2018年，全国以龙须菜为主要栽培种类的江蓠栽培面积超过14万亩，总产量超过3×10^5 t（干重），栽培产量居全国大型海藻栽培总产量的第二位（海带位居第一）。在20年内就实现了如此之大的历史性跨越，是我国大型海藻规模栽培从无到有的成功范例。目前，龙须菜栽培已形成了从基础研究到技术研发、栽培推广与产品研制的产业链。龙须菜栽培的经济效益、环境效益和社会效益显著。本文以汕头南澳海域龙须菜栽培为例，对南澳2017—2018年龙须菜的综合效益进行了分析。

4.1 龙须菜栽培直接经济效益分析

根据汕头市统计年鉴[①]，2017年和2018年南澳龙须菜产量（干重）分别为47 983 t和46 700 t；按平均销售价格7 000元/t（干重）计算，2017年和2018年龙须菜销售额分别为3.36亿元和3.27亿元，总价值为6.63亿元。

4.2 龙须菜高值化应用经济效益

（1）琼胶生产效益。2017—2018年，汕头市澄海区琼胶厂利用龙须菜等江蓠属大型海藻为原料，生产琼胶产品，2年新增产值9 476万元。大型海藻作为琼胶生产原料具有良好的经济效益。

（2）大型海藻规模栽培与鲍生态养殖经济效益。2017—2018年，汕头南澳海域开展了大型海藻龙须菜、脆江蓠与鲍生态养殖。大型海藻与鲍混养，能有效改善鲍养殖区的生态环境，收获的大型海藻又可作为鲍的饲料。据不完全统计，南澳海域养殖鲍产

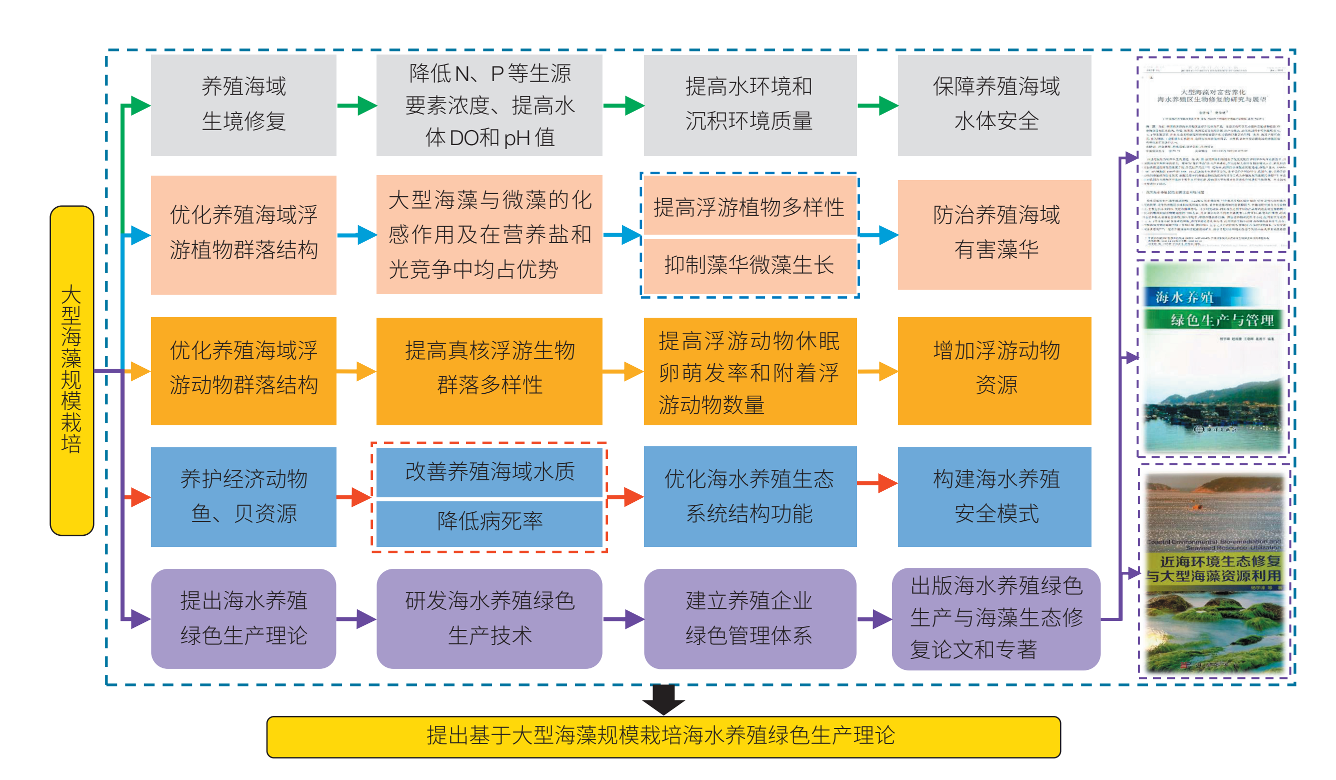


图2　基于大型海藻规模栽培的海水养殖绿色生产理论

Figure 2　Green production theory of mariculture based on large-scale cultivation of seaweeds

① 汕头市统计局. 汕头统计年鉴—2019. (2019-12-02)[2021-02-09]. https://www.shantou.gov.cn/tjj/tjsj/tjnj/nststjnj2019/content/post_1662282.html.
汕头市统计局. 汕头统计年鉴—2018. (2018-12-24)[2021-02-09]. https://www.shantou.gov.cn/tjj/tjsj/tjnj/nststjnj2018/content/post_859099.html.

量100 t以上；按平均销售价格12万元/t计算，每年鲍养殖的经济效益为1 200万元以上。大型海藻-鲍生态养殖海区水质良好，该生态养殖模式具有良好的经济和环境效益，为渔业资源可持续利用提供了新模式，值得推广应用。

4.3 龙须菜环境效益分析

依据汕头市统计年鉴②和相关数据[35,44,45]与价值评估方法[26,46-48]③，对南澳海域2017—2018年龙须菜环境效益进行了评估。

（1）固碳制氧价值。2017年南澳海域龙须菜栽培固碳制氧的总价值为4 523.49万元，2018年固碳制氧的总价值为4 402.53万元，2017—2018年固碳制氧总价值为8 926.02万元。

（2）生物栖息地价值。2017—2018年南澳龙须菜年平均栽培面积为1 500公顷。2017—2018年南澳龙须菜生物栖息地总价值为638.4万元。

（3）水质净化价值。2017年龙须菜水质净化价值为362.25万元，2018年龙须菜水质净化价值为352.45万元，2017—2018年南澳龙须菜栽培水质净化总价值为714.7万元。

4.4 社会效益分析

龙须菜规模栽培可为当地增加就业岗位。2017—2018年，每年从事大型海藻产业人员大约为1 000—2 000人；与大型海藻有关的交通、旅游、销售等相关人员1 000—2 000人②。通过龙须菜栽培，人们的海洋环境保护意识得到普遍提升，促进了海洋生态文明建设。龙须菜栽培的社会效益显著。

综上所述，我国龙须菜规模栽培在短短20年里实现了从无到有的历史性跨越，以龙须菜为代表的大型海藻栽培业经济效益、环境效益和社会效益显著。大型海藻栽培产业值得在沿海大力推广。

5 对策与建议

5.1 开展大型海藻规模栽培示范和推广，实施养殖海域综合负排放工程

以往的碳增汇主要靠陆地植树造林。由于农田稀缺和未来人口增长对粮食的需求矛盾不断凸显，单靠陆地植被增汇已无法满足我国碳中和需求。我国拥有世界上最大的海水养殖产业，是海洋经济的重要组成部分。目前，我国近海仅在约0.3%的海域面积开展了大型海藻栽培，大型海藻栽培产业还有很大的发展空间。大型海藻与鱼、贝类单位价格相比，经济价值相对较低，影响了渔民发展大规模栽培大型海藻的积极性。由于大型海藻在海洋碳汇及解决近海环境问题方面的重要生态作用，可采用国家生态补偿措施，由国家补偿渔民部分资金，以进一步提高大型海藻栽培规模。利用大型海藻在增加海洋碳汇、防治富营养化、低氧、酸化和有害藻华爆发方面的生态功能[16,49]，发展大型海藻与鱼、贝等经济动物复合养殖，是一种值得推荐的低碳绿色海水养殖模式。基于大型海藻栽培的海水养殖模式会增强海水增养殖的“负碳”效果。

5.2 提高大型海藻综合利用效率，实施大型海藻陆海统筹生态农业工程

陆源营养盐大量输入近海，导致近海环境富营养化、引发赤潮等生态灾害。在富营养化海区，规模栽培大型海藻，收获后的大型海藻可饲养牛、羊、猪，发展大型海藻生态农业。澳大利亚科学家与肉牛养

② 汕头市统计局．汕头统计年鉴—2019. (2019-12-02)[2021-02-09]. https://www.shantou.gov.cn/tjj/tjsj/tjnj/nststjnj2019/content/post_1662282.html.
汕头市统计局．汕头统计年鉴—2018. (2018-12-24)[2021-02-09]. https://www.shantou.gov.cn/tjj/tjsj/tjnj/nststjnj2018/content/post_859099.html.

③ 中华人民共和国国务院．排污费征收使用管理条例（国务院令第369号）. (2017-06-05)[2021-02-09]. http://www.ghb.gov.cn/doc/2015114/761226012.shtml.

殖企业合作，用大型海藻（*Asparagopsis* sp.）饲养肉牛，肉牛食用0.1%和0.2%（有机质含量）大型海藻后，能降低奶牛40%和98%的甲烷气体排放，实现肉牛养殖业碳中和[50]。目前，我国大型海藻的规模栽培主要局限于20 m以浅海域，栽培模式比较单一。根据大型海藻生态习性，可考虑在滩头及陆基池塘、海岛发展大型海藻栽培产业，以充分发挥大型海藻的生态、社会和经济效益。国家要从战略高度规划和支持大型海藻栽培业发展，扩增海洋碳汇，为解决全球海洋环境问题提出中国方案。因此，探索陆海统筹大型海藻增汇和资源养护与综合利用新模式，有益于海洋环境与农业经济，是海洋经济的新业态，可支撑海-陆经济一体化可持续发展。我国是农业大国，可借鉴澳大利亚的经验，利用大型海藻规模栽培开展陆海统筹减排增汇，这是一项成本低、效益高的碳中和有效途径。

5.3 实施产业链生态补偿制度，保障大型海藻产业可持续发展

以海带、紫菜、龙须菜为代表的大型海藻，在我国已形成了从基础研究、技术和产品研发的工厂化育苗、海上规模栽培、机械化或半机械化收获、产品加工和销售的产业链，环境效益、经济效益和社会效益显著。尽管大型海藻综合效益良好，但在大型海藻产业链中还有些技术壁垒有待攻克。例如，我国大型海藻采收和加工设备的自动化程度不高，少数大型海藻产品（如琼胶）生产工序还存在排污不达标等难题。国家应加强政策引领和技术改造，加大对海藻生产相关设备机械研发的支持力度或通过产业链前期大型海藻碳汇购买服务，落实大型海藻产业链定量化生态补偿。此外，还应通过构建"专家+当地政府+渔业乡土人才"服务模式，常态化为渔民提供技术指导和服务，打通大型海藻科技成果转化和技术推广的"最后一公里"，实现大型海藻产业可持续发展和产业链碳中和。

5.4 系统研究大型海藻生态系统结构和服务功能，完善大型海藻生态价值评估体系

应借鉴林业碳汇核算理论与方法，在已有的元素测定法、光合反应方程式法中做出科学判断，构建藻类碳汇核算理论体系，形成大型海藻碳汇核算标准；同时，综合评估大型海藻生态系统的结构和服务功能。大型海藻除具有重要的海洋碳汇功能外，还对解决海洋酸化、低氧、富营养化、有害藻华防控等海洋环境问题具有独特的优势和作用。此外，大型海藻还具有水质和底栖环境改善、生物资源养护等生态功能。通过大型海藻生态系统结构功能的深入研究，为大型海藻栽培生态价值核算与生态补偿机制的建立奠定基础和提供科学依据。在此基础上，建立我国大型海藻生态价值指数等信息发布制度，为政府和企业开展生态补偿和发展低碳经济提供科学依据。

5.5 加强涉海领域不同学科的交叉综合研究，支撑沿海低碳经济可持续发展

相比陆地碳汇研究的广度和深度，海洋碳汇的研究尚存在较大差距。目前，我国海洋碳汇监测体系尚未形成。针对这一现状，应系统开展海洋碳汇核查技术体系研究，解析碳汇构成、溯源碳汇成因，链接无机碳与有机碳库、生命与地球化学过程；查明主要碳汇生物族谱，按照碳汇效应分级建档，并在此基础上形成系统的海洋碳汇核查理论、监测指标和评估方法[11]。

中国碳市场是全球配额成交量第二大市场，但海洋碳汇标准体系仍是空白。因此，需要组织与海洋领域相关的海洋科学、生物学、渔业科学、生态环境科学、地质科学、经济学、管理学等学科的科学家联合攻关，开展交叉研究，加快海洋碳中和核算机制与方法学研究，建立海洋碳指纹、碳足迹、碳标识相应的方法与技术、CO_2地质封存、计量步骤与操作规范、评价标准，建立健全海洋碳汇交易体系。在此基础上，基于海洋环境承载力和低碳经济原理和技术，推广基于陆海统筹的藻、贝、鱼和陆地畜禽复合养殖系

统，形成多层次、立体化、低碳生态的海陆复合养殖新模式，保障沿海经济可持续发展。

5.6 加强国际合作，共同应对全球气候和环境问题

不同国家科技发展水平不同，需解决的环境问题有很大差异。通过国际合作，可以共享节能减排技术，从而促进人类对气候和环境问题的有效解决。基于大型海藻在CO_2捕获过程的高效性及在经济和碳汇中的重要作用，韩国学者Ik Kyo Chung联合中国、印度、印度尼西亚等国的学者组建了“亚洲藻类碳汇网络”（Asian Network for using Algae as a CO_2 sink）；通过藻类碳汇国际合作计划的实施，增加大型海藻栽培面积和新品种，提升了海洋碳汇潜力，为解决全球和区域性碳减排问题和发展低碳经济提供了典范。

6 结论

发展大型海藻碳汇，是缓解全球气候变暖、减少CO_2等温室气体、发展海洋低碳经济、实现碳中和的重要路径，值得全球沿海国家协作并推广应用。大型海藻规模栽培在增加海洋碳汇、环境修复和资源养护方面具有重要作用。推广基于大型海藻规模栽培的海洋负排放模式，是我国近海实现碳中和目标的有效途径。

参考文献

1 FAO. Global aquaculture production. [2021-02-09]. http://www.fao.org/fishery/statistics/global-aquaculture-production/query/en.

2 Wu J P, Zhang H B, Pan Y W, et al. Opportunities for blue carbon strategies in China. Ocean & Coastal Management, 2020, 194: 105241.

3 Buschmann A H, Camus C, Infante J, et al. Seaweed production: Overview of the global state of exploitation, farming and emerging research activity. European Journal of Phycology, 2017, 52(4): 391-406.

4 Lubchenco J, Haugan P M, Pangestu M E. Five priorities for a sustainable ocean economy. Nature, 2020, 588: 30-32.

5 Chung I K, Beardall J, Mehta S, et al. Using marine macroalgae for carbon sequestration: A critical appraisal. Journal of Applied Phycology, 2011, 23(5): 877-886.

6 European Commission. Science for Environment Policy: Salmon Aquaculture Could Incorporate Seaweed and Sea Urchins to Reduce Nitrogen Enrichment. Bristol: DG Environment News Alert Service, 2016.

7 Moreira D, Pires J C M. Atmospheric CO_2 capture by algae: Negative carbon dioxide emission path. Bioresource Technology, 2016, 215: 371-379.

8 DeVries T, Holzer M, Primeau F. Recent increase in oceanic carbon uptake driven by weaker upper-ocean overturning. Nature, 2017, 542: 215-218

9 刘慧, 唐启升. 国际海洋生物碳汇研究进展. 中国水产科学, 2011, 18(3): 695-702.

10 许冬兰. 蓝色碳汇：海洋低碳经济新思路. 中国渔业经济, 2011, 29(6): 44-49.

11 焦念志, 刘纪化, 石拓, 等. 实施海洋负排放，践行碳中和战略. 中国科学：地球科学, 2021, 51: 1-14.

12 Zhang Y Y, Zhang J H, Liang Y T, et al. Carbon sequestration processes and mechanisms in coastal mariculture environments in China. Science China Earth Sciences, 2017, 60(12): 2097-2107.

13 Jiao N Z, Wang H, Xu G H, et al. Blue carbon on the rise: Challenges and opportunities. National Science Review, 2018, 5(4): 464-468.

14 Wang F M, Sanders C J, Santos I R, et al. Global blue carbon accumulation in tidal wetlands increases with climate change. National Science Review, 2020, doi: 10.1093/nsr/nwaa296.

15 Pei L X, Ye S Y, Yuan H M, et al. Glomalin-related soil protein distributions in the wetlands of the Liaohe Delta, Northeast China: Implications for carbon sequestration and mineral

weathering of coastal wetlands. Limnology and Oceanography, 2020, 65(5): 979-991.

16 Hartmann J, West A J, Renforth P, et al. Enhanced chemical weathering as a geoengineering strategy to reduce atmospheric carbon dioxide, supply nutrients, and mitigate ocean acidification. Reviews of Geophysics, 2013, 51(2): 113-149.

17 Yang Y F, Chai Z Y, Wang Q, et al. Cultivation of seaweed *Gracilaria* in Chinese coastal waters and its contribution to environmental improvements. Algal Research, 2015, 9: 236-244.

18 Sui J J, Zhang J H, Ren S J, et al. Organic carbon in the surface sediments from the intensive mariculture zone of Sanggou Bay: Distribution, seasonal variations and sources. Journal of Ocean University of China, 2019, 18(4): 985-996.

19 Zhang D X, Tian X L, Dong S L, et al. Carbon dioxide fluxes from two typical mariculture polyculture systems in coastal China. Aquaculture, 2020, 521: 735041.

20 Zhang D, Tian X, Dong S, et al. Carbon budgets of two typical polyculture pond systems in coastal China and their potential roles in the global carbon cycle. Aquaculture Environment Interactions, 2020, 12: 105-115.

21 Wang Q, Luan L L, Chen L D, et al. Recruitment from an egg bank into the plankton in Baisha Bay, a mariculture base in Southern China. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2016, 181: 312-318.

22 Xie X F, He Z L, Hu X J, et al. Large-scale seaweed cultivation diverges water and sediment microbial communities in the Coast of Nan'ao Island, South China Sea. Science of the Total Environment, 2017, 598: 97-108.

23 Chai Z Y, He Z L, Deng Y Y, et al. Cultivation of seaweed *Gracilaria lemaneiformis* enhanced biodiversity in a eukaryotic plankton community as revealed via metagenomic analyses. Molecular Ecology, 2018, 27(4): 1081-1093.

24 Alpert S B, Spencer D F, Hidy G. Biospheric options for mitigating atmospheric carbon dioxide levels. Energy Conversion and Management, 1992, 33: 729-736.

25 权伟, 应苗苗, 康华靖, 等. 中国近海海藻养殖及碳汇强度估算. 水产学报, 2014, 38(4): 509-514.

26 岳冬冬, 王鲁民, 耿瑞, 等. 中国近海藻类养殖生态价值评估初探. 中国农业科技导报, 2014, 16(3): 126-133.

27 Sondak C F A, Ang P O, Beardall J, et al. Carbon dioxide mitigation potential of seaweed aquaculture beds (SABs). Journal of Applied Phycology, 2017, 29(5): 2363-2373.

28 焦念志, 李超, 王晓雪. 海洋碳汇对气候变化的响应与反馈. 地球科学进展, 2016, 31(7): 668-681.

29 Sarmiento J L, Bender M. Carbon biogeochemistry and climate change. Photosynthesis Research, 1994, 39(3): 209-234.

30 Ji Y, Xu Z G, Zou D H, et al. Ecophysiological responses of marine macroalgae to climate change factors. Journal of Applied Phycology, 2016, 28(5): 2953-2967.

31 Sabine C L, Feely R A, Gruber N, et al. The oceanic sink for anthropogenic CO_2. Science, 2004, 305: 367-371.

32 Gattuso J P, Magnan A, Billé R, et al. Contrasting futures for ocean and society from different anthropogenic CO_2 emissions scenarios. Science, 2015, 349: aac4722.

33 Keeling R F, Körtzinger A, Gruber N. Ocean deoxygenation in a warming world. Annual Review of Marine Science, 2010, 2(1): 199-229.

34 Melzner F, Thomsen J, Koeve W, et al. Future ocean acidification will be amplified by hypoxia in coastal habitats. Marine Biology, 2013, 160(8): 1875-1888.

35 刘之威, 罗洪添, 武宇辉, 等. 汕头南澳龙须菜规模栽培对水质和浮游植物的影响. 中国水产科学, 2019, 26(1): 99-107.

36 Xiao X, Agusti S, Lin F, et al. Nutrient removal from Chinese coastal waters by large-scale seaweed aquaculture. Scientific Reports, 2017, 7: 46613.

37 Lu H M, Xie H H, Gong Y X, et al. Secondary metabolites

from the seaweed *Gracilaria lemaneiformis* and their allelopathic effects on *Skeletonema costatum*. Biochemical Systematics and Ecology, 2011, 39: 397-400.

38 Zheng Y H, Jin R J, Zhang X J, et al. The considerable environmental benefits of seaweed aquaculture in China. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2019, 33: 1203-1221.

39 黄银爽, 欧林坚, 杨宇峰. 广东南澳岛大型海藻龙须菜与浮游植物对营养盐的竞争利用. 海洋与湖沼, 2017, 48(4): 806-813.

40 Yang Y F, Li C H, Nie X P, et al. Development of mariculture and its impacts in Chinese coastal waters. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 2004, 14: 1-10.

41 杨宇峰, 费修绠. 大型海藻对富营养化海水养殖区生物修复的研究与展望. 青岛海洋大学学报（自然科学版）, 2003, 33(1): 53-57.

42 杨宇峰, 赵细康, 王朝晖, 等. 海水养殖绿色生产与管理. 北京: 海洋出版社, 2007.

43 杨宇峰. 近海环境生态修复与大型海藻资源利用. 北京: 科学出版社, 2016.

44 Sun X, Liu Z W, Jiang Q C, et al. Concentrations of various elements in seaweed and seawater from Shen'ao Bay, Nan'ao Island, Guangdong Coast, China: Environmental monitoring and the bioremediation potential of the seaweed. Science of the Total Environment, 2019, 659: 632-639.

45 Luo H T, Wang Q, Liu Z W, et al. Potential bioremediation effects of seaweed *Gracilaria lemaneiformis* on heavy metals in coastal sediment from a typical mariculture zone. Chemosphere, 2020, 245: 125636.

46 Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Ecological Economics, 1998, 25 (1): 3-15.

47 肖建武, 康文星, 尹少华, 等. 城市森林固碳释氧功能及经济价值评估——以第三个“国家森林城市”长沙市为实证分析. 林业经济问题, 2009, 29(2): 129-132.

48 李岩, 付秀梅. 中国大型海藻资源生态价值分析与评估. 中国渔业经济, 2015, 33(2): 57-62.

40 Froehlich H E, Afflerbach J C, Frazier M, et al. Blue growth potential to mitigate climate change through seaweed offsetting. Current Biology, 2019, 29(18): 3087-3093.

50 Kinley R D, Martinez-Fernandez G, Matthews M K, et al. Mitigating the carbon footprint and improving productivity of ruminant livestock agriculture using a red seaweed. Journal of Cleaner Production, 2020, 259: 120836.

Large-scale Cultivation of Seaweed is Effective Approach to Increase Marine Carbon Sequestration and Solve Coastal Environmental Problems

YANG Yufeng[1,2*] LUO Hongtian[1,2] WANG Qing[1,2] HE Zhili[2,3] LONG Aimin[4]

（1 College of Life Science and Technology / Research Center on Low-carbon Economy for Guangzhou Region, Jinan University, Guangzhou 510632, China;

2 Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519000, China;

3 School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510006, China;

4 South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China）

Abstract All countries in the world are paying attention to low-carbon and carbon neutrality to achieve the mitigation of climate warming by reducing CO_2 emissions. Ocean is the largest carbon pool on the earth and play an important role of carbon neutrality. More than half of the biological carbon on the earth is achieved by marine organisms. Among them, seaweed resources are abundant, with advantages such as low cost, high yield, measurable carbon sink, and strong cultivation controllability. Industrialized blue carbon can be formed offshore, which is a sustainable model for future development in coastal ecosystems. In addition, large-scale cultivation of seaweed can provide potential solutions to the global marine environmental problems such as ocean acidification, hypoxia, eutrophication, and harmful algal blooms. This review focuses on the function of seaweed carbon sinks, and seaweeds' potential to solve coastal environmental problems in terms of cultivation, environmental bioremediation effects, and comprehensive benefit assessment. In conclusion, large-scale seaweed cultivation is an effective approach for developing low-carbon economy, increasing marine carbon sink capability, solving marine environmental problems, and finally achieving carbon neutrality.

Keywords seaweed, carbon sink, low-carbon economy, sustainable development, environmental bioremediation



杨宇峰 暨南大学生命科学技术学院教授、博士生导师。主要从事海洋环境和水生生物研究和教学工作。近年来，主持科学技术部、国家自然科学基金重点项目和面上基金10多项。在大型海藻生物修复与浮游生物生态学方面取得了较系统的研究成果，获国家和省部级科研奖励4次。发表论文180篇，出版专著2部。E-mail: tyyf@jnu.edu.cn

YANG Yufeng Professor and Ph.D. Supervisor at the College of Life Science and Technology, Jinan University. Dr. Yang's research interests are marine environment and hydrobiology. In recent years, he has led over 10 projects from Ministry of Science and Technology, and Natural Science Foundation of China. He has obtained a series of important achievements in areas of seaweed bioremediation and plankton ecology, and has won 4 times of Science and Technology Advancement Award at national, provincial and ministries levels. Up to now, he has published 180 papers and 2 books. E-mail: tyyf@jnu.edu.cn

■责任编辑：岳凌生

*Corresponding author